

AH

(19) BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

(12) **Patentschrift**  
(11) **DE 3627162 C2**

(51) Int. Cl. 5:  
**G01F 1/712**

(21) Aktenzeichen: P 36 27 162.4-52  
(22) Anmeldetag: 11. 8. 86  
(43) Offenlegungstag: 25. 2. 88  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 29. 11. 90

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

(73) Patentinhaber:  
Endress u. Hauser GmbH u. Co, 7864 Maulburg, DE

(74) Vertreter:  
Prinz, E., Dipl.-Ing.; Leiser, G., Dipl.-Ing.;  
Schwepfinger, K., Dipl.-Ing.; Bunke, H., Dipl.-Chem.  
Dr.rer.nat.; Degwert, H., Dipl.-Phys., Pat.-Anwälte,  
8000 München

(72) Erfinder:  
Schneider, Georg, Dipl.-Ing., 7513 Stutensee, DE;  
Braun, Hans, Dipl.-Ing., 7500 Karlsruhe, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht gezogene Druckschriften:  
DE 35 04 622 A1

(54) Anordnung zur berührungslosen Messung des Volumenstroms eines bewegten Mediums

DE 3627162 C2

DE 3627162 C2

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf eine Anordnung zur berührungslosen Messung des Volumenstroms eines bewegten Mediums gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Bei bekannten Meßanordnungen dieser Art wird die dem Maximum der zeitlichen Korrelationsfunktion der Ausgangssignale der beiden Wandler entsprechende Verschiebungszeit ermittelt, die gleich der Laufzeit der Inhomogenitäten des Mediums vom ersten zum zweiten Wandler ist. Bei bekanntem Abstand der Wandler kann man aus der Laufzeit die zu messende Geschwindigkeit ableiten. Durch Multiplikation des Geschwindigkeitswerts mit einem der momentanen Volumenbeladung entsprechenden Signalwert erhält man den Volumenstrom-Meßwert. Eine weitere Multiplikation des Volumenstrom-Meßwerts mit der Dichte des Mediums ergibt den Massenstrom. Dieses Meßverfahren ist in vielen Anwendungsfällen mit Unsicherheiten behaftet, weil das Meßergebnis vom Strömungsprofil abhängig ist, und weil das Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion oft wenig ausgeprägt ist, so daß der Ort des Maximums nicht genau bestimmt werden kann. Andere berührungslose Meßverfahren lassen die Strömungsrichtung nicht erkennen und ergeben keine verwertbare Anzeige bei der Geschwindigkeit Null und bei sehr kleinen Geschwindigkeiten. Schließlich ist auch die Ermittlung des Volumen- oder Massenstroms aus der Geschwindigkeit mit Hilfe einer zusätzlichen Volumenbeladungs-Information unständlich und eine weitere Ursache für Meßfehler.

Zur Vermeidung der Schwierigkeiten, die sich bei der Bestimmung des Maximums der Kreuzkorrelationsfunktion der von zwei Wandlern gelieferten Signale ergeben, ist in der nicht vorveröffentlichten, aber zum Stand der Technik gehörenden Patentanmeldung P 35 04 622.8 eine Anordnung zur berührungslosen Messung der Geschwindigkeit eines bewegten Mediums beschrieben, bei welcher der Geschwindigkeitswert aus der Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion der beiden Signale bei der zeitlichen Verschiebung Null oder, was mathematisch äquivalent ist, aus dem ersten Moment des Kreuzleistungsdichtespektrums der beiden Signale abgeleitet wird. Voraussetzung hierfür ist, daß die Geometrie und gegenseitige Anordnung der beiden Wandler aufgrund der räumlichen Kreuzkorrelationsfunktion der räumlichen Gewichtungsfunktionen ihrer Erfassungsbereiche so bestimmt ist, daß der Gradient dieser räumlichen Korrelationsfunktion bei der räumlichen Verschiebung Null vom Nullvektor verschieden ist. Diese ältere Anordnung liefert jedoch wiederum nur einen Geschwindigkeitswert; zur Ermittlung des Volumenstrom-Meßwerts muß der Geschwindigkeitswert mit dem der momentanen Volumenbelastung entsprechenden Signalwert multipliziert werden, der auf andere Weise ermittelt werden muß.

Aufgabe der Erfindung ist die Schaffung einer Meßanordnung der eingangs angegebenen Art, die unmittelbar den Meßwert des Volumenstroms der die Volumenbeladung ausmachenden Inhomogenitäten des bewegten Mediums ermittelt, die ferner bei allen Geschwindigkeiten ein vom Strömungsprofil unabhängiges genaues Meßergebnis liefert und deren Meßbereich auch die Geschwindigkeit Null, sehr kleine Geschwindigkeiten und die Umkehr der Bewegungsrichtung einschließt.

Diese Aufgabe wird nach der Erfindung durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst.  
Die Erfindung beruht auf der Erkenntnis, daß unter bestimmten Voraussetzungen die Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der zeitlichen Verschiebung Null ein Maß für den Volumenstrom der die Volumenbeladung ausmachenden Inhomogenitäten des bewegten Mediums bildet. Da dieser Meßwert bei der zeitlichen Verschiebung Null ermittelt wird, stammt er von Inhomogenitäten, die sich am gleichen Ort befinden. Dadurch werden wesentliche Ursachen für Ungenauigkeiten bei der Messung beseitigt. Ferner ist die berührungslose korrelative Messung des Volumen- oder Massenstroms auch in Fällen möglich, in denen die auf der Ermittlung der Lage des Maximums der Kreuzkorrelationsfunktion beruhende Geschwindigkeitsmessung versagt. Insbesondere ist es möglich, auf Anlaufstrecken zu verzichten und beispielsweise eine Meßstelle direkt hinter einem Krümmer anzubringen. Der Meßbereich ist prinzipiell nicht eingeschränkt und schließt insbesondere sehr langsame Bewegungen, Stillstand und Umkehr der Bewegungsrichtung ein.

Voraussetzung für die Anwendung dieses Meßprinzips ist, daß Wandler verwendet werden, die ein Signalpaar erzeugen, bei dem ein nicht verschwindender Gradient in der statistischen Abhängigkeit der beiden zeitlich nicht verschobenen Signale existiert. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn sich die Erfassungsbereiche der beiden Wandler derart teilweise überlappen, daß der Gradient der räumlichen Kreuzkorrelationsfunktion der räumlichen Gewichtungsfunktionen bei der räumlichen Verschiebung Null vom Nullvektor verschieden ist. Bei dieser Definition handelt es sich um eine unveränderliche, durch die Ausbildung der Wandler bestimmte geometrische Eigenschaft, die für jedes Wandlerpaar kennzeichnend ist.

Die Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion von zwei Signalen bei der zeitlichen Verschiebung Null, ist dem ersten Moment des Kreuzleistungsdichtespektrums dieser Signale mathematisch äquivalent. Es macht daher keinen Unterschied, ob man den einen oder den anderen Wert berechnet.

Verteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen gekennzeichnet.

Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in der Zeichnung dargestellt. In der Zeichnung zeigt Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Meßanordnung zur berührungslosen korrelativen Messung des Volumenstroms in einer Rohrleitung.

Fig. 2 Diagramme von räumlichen Funktionen, die für den Aufbau der Meßanordnung von Fig. 1 kennzeichnend sind.

Fig. 3 Diagramme von zeitlichen Funktionen, die für die Funktionsweise der Meßanordnung von Fig. 1 kennzeichnend sind.

Fig. 4 mehrere mit der gleichen Meßanordnung nach der Erfindung für verschiedene Geschwindigkeiten bei konstanter Volumenbeladung aufgenommene zeitliche Kreuzkorrelationsfunktionen.

Fig. 5 mehrere mit der gleichen Meßanordnung nach der Erfindung für verschiedene Volumenbeladungen bei

konstanter Geschwindigkeit aufgenommene zeitliche Kreuzkorrelationsfunktionen,

Fig. 6 eine optische Meßanordnung nach der Erfindung,

Fig. 7 die Seitenansicht der optischen Meßanordnung von Fig. 6,

Fig. 8 eine kapazitive Meßanordnung nach der Erfindung,

Fig. 9 eine optische Meßanordnung nach der Erfindung mit einem Photodiodenarray und

Fig. 10 eine Analogsignalverarbeitungsschaltung zur Gewinnung des Meßwerts bei einer Meßanordnung nach der Erfindung.

Fig. 1 zeigt in einer schematischen Darstellung eine korrelative Meßanordnung zur Messung des Volumenstroms der die Volumenbeladung ausmachenden Inhomogenitäten eines Mediums, das sich mit der Geschwindigkeit  $v$  durch eine Rohrleitung 1 in der Richtung der Rohrleitungsachse  $z$  bewegt. An der Rohrleitung 1 sind in einem genau bekannten Mittenabstand  $D$  zwei Wandler  $W_1$  und  $W_2$  angeordnet, die elektrische Signale  $S_1(t)$  bzw.  $S_2(t)$  liefern, die durch Inhomogenitäten des bewegten Mediums beeinflußt werden. Je nach der Art und Beschaffenheit des bewegten Mediums können die nutzbaren Inhomogenitäten von sehr verschiedener Art sein, doch beruht ihre Wirkung letzten Endes immer darauf, daß sie entweder ein akustisches oder ein elektromagnetisches Feld beeinflussen oder erzeugen. Für die mit elektromagnetischen Feldern arbeitenden Verfahren kann das gesamte Spektrum vom elektrostatischen Feld über den Hochfrequenz- und Mikrowellenbereich und den optischen Bereich bis zur  $\gamma$ -Strahlung genutzt werden. Bei akustischen Feldern reicht der nutzbare Frequenzbereich von wenigen Kilohertz in Gasen bis zu 10 MHz oder mehr bei flüssigen Trägermedien.

Gewöhnlich besteht jeder Wandler aus einem Sender, der das von den Inhomogenitäten des Mediums zu beeinflussende Feld erzeugt, und aus einem Empfänger, der auf das von den Inhomogenitäten beeinflußte Feld anspricht und ein die zeitlichen Änderungen des Feldes wiedergebendes elektrisches Signal abgibt. So besteht in Fig. 1 der Wandler  $W_1$  aus einem Sender  $T_1$  und einem Empfänger  $R_1$ , und der Wandler  $W_2$  besteht aus einem Sender  $T_2$  und einem Empfänger  $R_2$ . Die Ausbildung der Sender und Empfänger, je nach der Art des ausgenutzten Feldes, ist dem Fachmann bekannt. So kann bei Anwendung eines im optischen Bereich liegenden elektrischen Feldes jeder Sender eine Lichtquelle und jeder Empfänger ein Photodetektor sein. Bei Anwendung eines im Ultraschallbereich liegenden akustischen Feldes ist jeder Sender ein Ultraschallzeuger und jeder Empfänger ein Ultraschalldetektor. Kapazitive Sensoren bilden zugleich Sender und Empfänger für elektrostatische Felder usw.

Wenn die Inhomogenitäten aktiv sind und selbst ein nutzbares Feld erzeugen, können die Sender entfallen, so daß jeder Wandler nur aus einem Empfänger besteht. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Inhomogenitäten durch radioaktive Partikel gebildet sind, deren Strahlung von den Empfängern der Wandler aufgefangen und in ein elektrisches Signal umgewandelt wird.

Jede Inhomogenität des bewegten Mediums geht nach einer vorbestimmten räumlichen Gewichtungsfunktion in das Ausgangssignal eines Wandlers ein, wenn sie sich in dessen Erfassungsbereich befindet. Bei dem Anwendungsbeispiel von Fig. 1 ist der Erfassungsbereich des Wandlers  $W_1$  ein Meßvolumen, das in der Richtung der  $z$ -Achse die Länge  $L_1$  und senkrecht zur  $z$ -Achse den Querschnitt der Rohrleitung 1 oder einen vom Wandler erfaßten Teil dieses Querschnitts hat. In gleicher Weise ist der Erfassungsbereich des Wandlers  $W_2$  ein Meßvolumen mit der Länge  $L_2$  und einem entsprechenden Querschnitt.

Eine wesentliche Eigenschaft der Anordnung von Fig. 1 besteht darin, daß sich die Erfassungsbereiche der beiden Wandler  $W_1$  und  $W_2$  teilweise überlappen. Dies muß durch eine entsprechende Ausbildung der Wandler erreicht werden, was bei der schematischen Darstellung von Fig. 1 dadurch angedeutet ist, daß sich auch die Sender  $T_1$ ,  $T_2$  und die Empfänger  $R_1$ ,  $R_2$  der beiden Wandler gegenseitig teilweise überlappen.

Das Diagramm A von Fig. 2 zeigt in idealisierter Darstellung als Funktion der Koordinate  $z$  die räumliche Gewichtungsfunktion  $g_1(z)$  des Wandlers  $W_1$ , d. h. die Auswirkung einer punktförmigen Inhomogenität auf das Ausgangssignal des Wandlers  $W_1$  in Abhängigkeit von ihrer räumlichen Position entlang der  $z$ -Achse. Wenn sich die punktförmige Inhomogenität außerhalb des Erfassungsbereichs des Wandlers  $W_1$  befindet, geht sie nicht in das Ausgangssignal  $S_1(t)$  ein, und die räumliche Gewichtungsfunktion  $g_1(z)$  hat den Wert 0. Wenn sich die punktförmige Inhomogenität im Erfassungsbereich des Wandlers  $W_1$  befindet, geht sie dagegen mit einem vorbestimmten, von Null verschiedenen Wert in das Ausgangssignal  $S_1(t)$  ein, so daß die räumliche Gewichtungsfunktion  $g_1(z)$  für den gesamten Erfassungsbereich einen von Null verschiedenen Wert annimmt.

In entsprechender Weise zeigt das Diagramm B von Fig. 2 die räumliche Gewichtungsfunktion  $g_2(z)$  des Wandlers  $W_2$ . Wenn die beiden Wandler  $W_1$  und  $W_2$  gleich ausgebildet sind, hat die räumliche Gewichtungsfunktion  $g_2(z)$  die gleiche Kurvenform wie die räumliche Gewichtungsfunktion  $g_1(z)$ , doch unterscheidet sie sich von dieser durch ihre andere Lage in bezug auf die Abszissenachse  $z$ .

Infolge der teilweisen Überlappung der Erfassungsbereiche der Wandler  $W_1$ ,  $W_2$  überlappen sich auch die in den Diagrammen A und B von Fig. 2 dargestellten räumlichen Gewichtungsfunktionen  $g_1(z)$  und  $g_2(z)$  teilweise um einen Betrag  $F$ .

Das Diagramm C von Fig. 2 zeigt die räumliche Kreuzkorrelationsfunktion  $\Phi_{12}(u)$  der räumlichen Gewichtungsfunktionen  $g_1(z)$  und  $g_2(z)$ . Die räumliche Kreuzkorrelationsfunktion hat die mathematische Form

$$\Phi_{12}(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_2(z) g_1(z+u) dz \quad (1)$$

Sie bedeutet, daß die Werte der Gewichtungsfunktion  $g_2(z)$  mit den um eine räumliche Verschiebung  $u$  verschobenen Werten der räumlichen Gewichtungsfunktion  $g_1(z)$  multipliziert werden und der Mittelwert der Produkte über den ausgewerteten Bereich  $Z$  gebildet wird. Für jeden Wert der räumlichen Verschiebung  $u$

erhält man einen Stützwert der räumlichen Korrelationsfunktion. Die räumliche Verschiebung  $z=0$  entspricht der in den Diagrammen A und B dargestellten Ausgangslage der räumlichen Gewichtungsfunktionen, also der räumlichen Lage der Wandler  $W_1$  und  $W_2$  von Fig. 1, und zunehmende Werte von  $u$  entsprechen einer Verringerung der gegenseitigen Versetzung der miteinander korrelierten Werte der beiden räumlichen Gewichtungsfunktionen. Infolge der gegenseitigen Überlappung der räumlichen Gewichtungsfunktionen hat die im Diagramm C von Fig. 2 dargestellte räumliche Kreuzkorrelationsfunktion  $\Phi_{12}(u)$  bei der räumlichen Verschiebung  $u=0$  einen von Null verschiedenen Wert und einen Gradienten, der vom Nullvektor verschieden ist. Die räumliche Kreuzkorrelationsfunktion nimmt den Wert Null erst bei einer negativen räumlichen Verschiebung  $u=-F$  an, und sie erreicht ihr Maximum bei der positiven räumlichen Verschiebung  $u=D$ , bei der die beiden Gewichtungsfunktionen  $g_1(z)$  und  $g_2(z)$  kongruent sind.

Sowohl die räumlichen Gewichtungsfunktionen  $g_1(z)$ ,  $g_2(z)$  als auch deren räumliche Kreuzkorrelationsfunktion  $\Phi_{12}(u)$  sind unveränderliche Kenngrößen der Wandler  $W_1$  und  $W_2$ , die durch die Geometrie der Wandler bedingt und somit zu deren Charakterisierung geeignet sind.

Die Diagramme A und B von Fig. 3 zeigen den zeitlichen Verlauf der Ausgangssignale  $S_1(t)$  und  $S_2(t)$  der Wandler  $W_1$ ,  $W_2$ . Die Schwankungen dieser Signale stammen von den durch die Erfassungsbereiche der Wandler gehenden Inhomogenitäten des bewegten Mediums. Unter der Voraussetzung, daß diese Inhomogenitäten auf dem Weg vom ersten zum zweiten Wandler wenigstens teilweise bestehen bleiben, weisen die von ihnen verursachten Schwankungen der Ausgangssignale der beiden Wandler gewisse Ähnlichkeiten auf, die gegeneinander um eine Zeitspanne versetzt sind, die gleich der Laufzeit der Inhomogenitäten vom ersten zum zweiten Wandler ist.

Das Diagramm C von Fig. 3 zeigt die zeitliche Kreuzkorrelationsfunktion  $R_{12}(\tau)$  der beiden Signale  $S_1(t)$  und  $S_2(t)$ . Die zeitliche Kreuzkorrelationsfunktion hat die matematISCHE Form

$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T S_1(t) S_2(t + \tau) dt : \quad (2)$$

Sie bedeutet, daß die Augenblickswerte des Signals  $S_2(t)$  mit den um eine Verschiebezeit  $\tau$  verschobenen Augenblickswerten des Signals  $S_1(t)$  multipliziert werden und der Mittelwert der Produkte über den Bereich der Beobachtungszeit  $T$  gebildet wird. Für jeden Wert von  $\tau$  erhält man einen Stützwert der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion. Bei dem betrachteten Anwendungsfall hat die Kreuzkorrelationsfunktion ein Maximum bei einer bestimmten Verschiebungszeit  $\tau_M$ , die gleich der Laufzeit der Inhomogenitäten des Mediums vom Wandler  $W_1$  zum Wandler  $W_2$  ist, wenn also gilt:

$$\tau_M = \frac{D}{v} \quad (3)$$

Infolge der gegenseitigen Überlappung der beiden Gewichtungsfunktionen  $g_1(z)$  und  $g_2(z)$  hat die im Diagramm C von Fig. 3 dargestellte zeitliche Kreuzkorrelationsfunktion  $R_{12}(\tau)$  der Signale  $S_1(t)$  und  $S_2(t)$  bei der Verschiebungszeit  $\tau=0$  einen von Null verschiedenen Wert und eine von Null verschiedene Steigung, die durch den Winkel  $\alpha$  zwischen der Tangente an die zeitliche Kreuzkorrelationsfunktion im Schnittpunkt mit der im Punkt  $\tau=0$  errichteten Koordinatenachse und der Horizontalen repräsentiert ist.

Zur Ermittlung der Kreuzkorrelationsfunktion werden die Signale  $S_1(t)$  und  $S_2(t)$  nach der erforderlichen Vorbehandlung in einer Signalverarbeitungsschaltung 2 einem Korrelator 4 zugeführt. Eine mit dem Korrelator 4 verbundene Auswerteschaltung 6 ermittelt aus der Kreuzkorrelationsfunktion den Volumenstrom der die Volumenbeladung bildenden Inhomogenitäten des durch das Rohr 1 bewegten Mediums. Vorzugsweise übernimmt ein geeignet programmierte Mikrocomputer die Funktionen des Korrelators 4 und der Auswerteschaltung 6. In diesem Fall enthält die Signalverarbeitungsschaltung 2 einen Analog/Digital-Wandler, der die analogen Ausgangssignale  $S_1(t)$  und  $S_2(t)$  in digitale Signale umwandelt, die für die Verarbeitung im Mikrocomputer geeignet sind.

Nach dem Stand der Technik ermittelt die Auswerteschaltung 6 aufgrund der Korrelation der Signale  $S_1(t)$  und  $S_2(t)$  die Geschwindigkeit  $v$  des durch die Rohrleitung 1 der Querschnittsfläche  $A_T$  strömenden Mediums. Zur Bestimmung des Volumenstroms benötigt die Auswerteschaltung 6 dann zusätzlich zu der Geschwindigkeitsinformation noch eine Information über die Volumenbeladung (Volumendichte)  $V_{rel}$ , d. h. über den relativen Anteil der Volumen  $V_M$  des transportierten Mediums am Transportvolumen  $V_T$ :

$$V_{rel} = \frac{V_M}{V_T} \quad (4)$$

Bei Kenntnis der Volumenbeladung  $V_{rel}$  ergibt sich der Volumenstrom  $V$ , d. h. das pro Zeiteinheit transportierte Volumen des bewegten Mediums, aus der folgenden Beziehung:

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = V_{rel} \cdot A_T \cdot v \left[ \text{z.B. } \frac{\text{m}^3}{\text{min}}, \frac{1}{\text{sec}} \text{ usw.} \right] \quad (5)$$

Der Massenstrom  $\dot{m}$  des bewegten Mediums, d. h. die pro Zeiteinheit transportierte Mediumsmasse, ist dann gleich dem Produkt aus dem Volumenstrom  $\dot{V}$  und der Dichte  $\rho$  des transportierten Mediums:

$$\dot{m} = \frac{d\dot{m}}{dt} = \dot{V} \cdot \rho \left[ \text{z. B. } \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \quad (6)$$

Voraussetzung für diese Art der Messung der Volumenströms ist die Kenntnis der Volumenbeladung  $V_{rel}$ , die auf andere Weise ermittelt werden muß.

Die Besonderheit der Meßanordnung von Fig. 1 besteht darin, daß der Meßwert des Volumenstroms ohne Kenntnis der Volumenbehandlung unmittelbar aus der Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit  $t=0$  abgeleitet wird. Diese Maßnahme beruht auf der Erkenntnis, daß ein eindeutiger, mathematisch definierbarer Zusammenhang zwischen der Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit  $t=0$  und dem momentanen Volumenstrom bzw. Massenstrom des Mediums besteht. Fig. 4 zeigt die für die verschiedene Geschwindigkeiten  $v_1, v_2, v_3$  des Mediums bei konstanter Volumenbeladung ermittelten zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktionen. Wie zu erkennen ist, schneiden alle Kreuzkorrelationsfunktionen die durch  $t=0$  gehende Ordinatenachse im gleichen Punkt, aber mit unterschiedlichen Steigungen. Dabei ist die Steigung um so größer, je größer die Geschwindigkeit ist. Zur Veranschaulichung kann man sagen, daß bei Geschwindigkeitsveränderungen sich die Kreuzkorrelationsfunktion wie ein Ziehharmonikabalg dehnt und staucht. Da gemäß Gleichung (5) der Volumenstrom  $\dot{V}$  bei konstanter Volumenbeladung  $V_{rel}$  der Geschwindigkeit proportional ist, ist im Diagramm von Fig. 4 die Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der zeitlichen Verschiebung Null ein Maß für den Volumenstrom und — bei bekannter Dichte  $\rho$  des Mediums — gemäß Gleichung (6) auch ein Maß für den Massenstrom.

In entsprechender Weise zeigt Fig. 5 die mit der gleichen Meßanordnung für verschiedene Volumenbeladungen bei konstanter Geschwindigkeit ermittelten zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktionen. In diesem Fall liegen die Maxima aller Kreuzkorrelationsfunktionen bei der gleichen Verschiebungszeit  $t$ , die der konstanten Geschwindigkeit entspricht, jedoch ergibt sich eine der Volumenbeladung proportionale Vergrößerung der Werte der Kreuzkorrelationsfunktion. Demzufolge schneiden alle Kreuzkorrelationsfunktionen die durch  $t=0$  gehende Ordinatenachse wiederum mit unterschiedlichen Steigungen, diesmal jedoch nicht im gleichen Punkt. Dabei ist die Steigung um so größer, je größer die Volumenbeladung ist. Da gemäß Gleichung (5) der Volumenstrom  $\dot{V}$  bei konstanter Geschwindigkeit  $v$  der Volumenbeladung  $V_{rel}$  proportional ist, ist auch in diesem Fall die Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der zeitlichen Verschiebung Null ein Maß für den Volumenstrom und für den Massenstrom.

Der gleiche Zusammenhang zwischen der Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit  $t=0$  und dem Volumenstrom bzw. dem Massenstrom besteht auch dann, wenn sich die Geschwindigkeit und die Volumenbeladung gleichzeitig ändern. In jedem Fall kann der Meßwert des Volumenstroms und/oder des Massenstroms unmittelbar aus der Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der zeitlichen Verschiebung Null abgeleitet werden.

Der mathematische Zusammenhang zwischen dem Massenstrom  $\dot{m}$  und der Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der zeitlichen Verschiebung Null ist durch die folgende Gleichung gegeben:

$$\dot{m} = \frac{\Phi_{12}(0)}{\frac{d}{du} \Phi_{12}|_{u=0}} \cdot \dot{R}_{12}(0) \cdot K \quad (7)$$

Darin sind:

$\Phi_{12}(0)$ : der Wert der räumlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der räumlichen Verschiebung  $u = 0$ ;

$\frac{d}{du} \Phi_{12}|_{u=0}$ : der Gradient der räumlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der räumlichen Verschiebung  $u = 0$ ;

$\dot{R}_{12}(0)$ : der Gradient der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit  $t = 0$ ;

$K$ : Kalibrationsfaktor (berücksichtigt die Dichte des Mediums).

Der erste Faktor auf der rechten Seite der Gleichung (7) ist ein einmalig zu bestimmender Geometrieterm, der sich, wie anhand von Fig. 4 und Fig. 5 erläutert wurde, aus dem Aufbau und der Anordnung der Wandler ergibt. Der zweite Faktor drückt die Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der zeitlichen Verschiebung Null aus. Der Kalibrationsfaktor  $K$  ist ein einmalig zu bestimmender, von der Dichte des transportierten Mediums abhängiger Faktor.

Die Gleichung (7) gilt auch für die Bestimmung des Volumenstroms, jedoch mit dem Unterschied, daß der Kalibrationsfaktor  $K$  dann nicht von der Dichte des Mediums abhängig ist.

Wie aus der Gleichung (7) zu ersehen ist, sind zur Bestimmung des Massenstroms und/oder des Volumenstroms keine von der Volumenbehandlung abhängigen zusätzlichen Informationen erforderlich, wenn der Meßwert unmittelbar aus der Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der zeitlichen Verschiebung Null und nicht aus der zuvor gemessenen Geschwindigkeit abgeleitet wird. Dies beruht darauf, daß in die

Berechnung automatisch die Beladungsinformation einbezogen wird, die in den Signalen  $S_1(t)$  und  $S_2(t)$  enthalten ist, die von den Wandlern  $W_1$  bzw.  $W_2$  der Meßanordnung von Fig. 1 geliefert werden.

Eine Voraussetzung für die angegebene Funktionsweise besteht darin, daß die Signalleistung, also die Amplitudeninformation, bei der Signalverarbeitung und bei der Korrelation nicht verlorengehen darf. Die Korrelation im Korrelator 4 darf also nicht mit "geklippten" Signalen oder reinen Vorzeichensignalen durchgeführt werden. Bei einer rein analogen Signalverarbeitung ist diese Bedingung in der Regel erfüllt. Bei digitaler Signalverarbeitung muß die Amplitudeninformation mit ausreichender Auflösung (Bit-Stellenzahl) in die digitalen Codewörter umgesetzt werden.

Die Gleichung (7) läßt erkennen, daß der Gradient der räumlichen Kreuzkorrelationsfunktion nicht verschwinden darf, weil er im Nenner steht. Diese Bedingung ist nur dann erfüllt, wenn sich die Erfassungsbereiche der Wandler in der aufhand von Fig. 1 und 2 erläuterten Weise überlappen.

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten, die Wandler so auszubilden, daß sich ihre Erfassungsbereiche überlappen. Die Fig. 6 und 7 zeigen als Beispiel eine optische Meßanordnung zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit eines durch ein Plexiglasrohr 10 strömenden Mediums. Der Wandler  $W_1$  erhält als Sender eine Lichtquelle 11 und als Empfänger eine Photodiode 12. Der Wandler  $W_2$  erhält als Sender eine Lichtquelle 13 und als Empfänger eine Photodiode 14. Jeder Wandler ist so ausgebildet, daß unter Berücksichtigung der Linsenwirkung des Plexiglasrohrs 10 eine weitgehend homogene Gewichtung des Rohrquerschnitts erreicht wird. Die optischen Achsen der beiden Wandler kreuzen sich rechtwinklig. Wie Fig. 7 zeigt, sind die Lichtquellen 11, 13 und die Photodioden 12, 14 der beiden Wandler längs der Rohrachse  $z$  etwas gegeneinander versetzt, so daß sich die Erfassungsbereiche der beiden Wandler etwa zur Hälfte überlappen. Zur Verdeutlichung ist die Ausdehnung der Lichtquellen 11, 13 und der Photodioden 12, 14 in der Richtung der Rohrachse  $z$  in Fig. 7 übertrieben groß dargestellt. Die Überlappung der Erfassungsbereiche wird in diesem Fall durch die gekreuzte Anordnung der Wandler ermöglicht.

Fig. 6 zeigt auch die Ausbildung der beiden Signalverarbeitungsschaltungen, denen die Ausgangssignale  $S_1(t)$  und  $S_2(t)$  der Wandler  $W_1$  und  $W_2$  zugeführt werden. In jeder Signalverarbeitungsschaltung wird das Ausgangssignal des zugeordneten Wandlers zunächst in einem Vorverstärker 15 verstärkt und dann in einem Hochpaßfilter 16 gefiltert, wodurch der Mittelwert des Signals unterdrückt wird. Nach erneuter Verstärkung in einem Verstärker 17 wird jedes Signal einem Analog/Digital-Wandler 18 zugeführt, der das mittelwertfreie Analogsignal in ein für die Verarbeitung im Mikrocomputer geeignetes Digitalsignal umwandelt. An die Analog/Digital-Wandler 18 schließt sich ein Mikrocomputer 19 an, der die Funktionen des Korrelators 4 und der Auswerteschaltung 6 von Fig. 1 ausübt.

Eine andere Möglichkeit zur Realisierung von sich teilweise überlappenden Erfassungsbereichen besteht darin, daß jeder Wandler aus mehreren Wandlerbereichen besteht, die mit den Wandlerelementen des anderen Wandlers verschachtelt sind. Fig. 8 zeigt als Beispiel hierfür eine Meßanordnung mit kapazitiven Wandlern zur Messung des Volumenstroms und/oder des Massenstroms eines durch ein Rohr 20 strömenden Mediums. Der Wandler  $W_1$  besteht aus fünf Wandlerelementen 21, 22, 23, 24, 25, von denen jedes in der üblichen Weise durch zwei am Umfang des Rohres 20 einander diametral gegenüberliegende Elektroden gebildet ist. Die Wandlerelemente 21, 22, 23, 24, 25 sind längs der Rohrachse in Abständen angeordnet, so daß zwischen ihnen Lücken bestehen. Der Wandler  $W_2$  besteht in gleicher Weise aus fünf Wandlerelementen 31, 32, 33, 34, 35, die längs der Rohrachse in Abständen angeordnet sind, so daß zwischen ihnen Lücken bestehen. Die Wandlerelemente 31 und 32 des Wandlers  $W_2$  liegen in den Lücken zwischen den Wandlerelementen 23 und 24 bzw. 24 und 25 des Wandlers  $W_1$ , wodurch die gewünschte Überlappung der Erfassungsbereiche der beiden Wandler  $W_1$  und  $W_2$  erreicht wird.

Anstatt jeden der beiden Wandler mit eigenen Wandlerelementen auszustatten, ist es auch möglich, die Ausgangssignale der gleichen Wandlerelemente in unterschiedlicher Weise zusammenzufassen, um die sich überlappenden Erfassungsbereiche von zwei Wählern zu realisieren. Fig. 9 zeigt eine Meßanordnung mit einem Array von Photodioden 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, die längs der Bewegungsrichtung  $z$  des bewegten Mediums angeordnet sind und das Licht einer gemeinsamen Lichtquelle 40 empfangen. Jede Photodiode bildet in Verbindung mit der Lichtquelle ein Wandlerelement und gibt ein durch die Inhomogenitäten des bewegten Mediums beeinflußtes elektrisches Ausgangssignal  $S_{41}, S_{42} \dots S_{48}$  ab. Die Ausgänge der Photodioden sind mit den Eingängen von zwei Summierschaltungen 51 und 52 verbunden, die die Ausgangssignale der Photodioden zur Bildung der beiden zu korrelierenden Signale  $S_1(t)$  und  $S_2(t)$  mit unterschiedlicher Vorzeichenbewertung zusammenfassen. Beispielsweise können die  $S_1(t)$  und  $S_2(t)$  in der folgenden Weise gebildet sein:

$$S_1(t) = +S_{41} + S_{42} - S_{43} - S_{44} + S_{45} + S_{46} - S_{47} - S_{48}$$

$$S_2(t) = -S_{41} + S_{42} + S_{43} - S_{44} - S_{45} + S_{46} + S_{47} - S_{48}$$

Diese Realisierung der sich überlappenden Erfassungsbereiche ergibt den Vorteil, daß die Signale  $S_1(t)$  und  $S_2(t)$  mittelwertfrei sind, so daß die Notwendigkeit einer Hochpaßfilterung entfällt. Ferner wird die Auswirkung von Konzentrationsschwankungen auf das Meßergebnis unterdrückt. Die gleiche Maßnahme läßt sich anstatt mit Photodioden natürlich ebenso mit akustischen, kapazitiven oder anderen Wandlerelementen durchführen.

Anstatt die Signalverknüpfung simultan mit zwei Summierschaltungen vorzunehmen, kann sie auch im Zeitmultiplex mit der gleichen Summierschaltung erfolgen.

Die mit den Anordnungen von Fig. 8 oder Fig. 9 erhaltenen Signale  $S_1(t)$  und  $S_2(t)$  können dann in der zuvor erläuterten Weise weiterverarbeitet werden, um die zeitliche Kreuzkorrelationsfunktion zu bilden, deren Steigung bei der Verschiebungszeit  $\tau=0$  zu ermitteln und daraus den Meßwert des Volumenstroms und/oder des Massenstroms abzuleiten.

Anstatt diese Operationen in einem Mikrocomputer durchzuführen, ist es auch möglich, das Ergebnis durch unmittelbare Verarbeitung der elektrischen Signale in einer Hardware-Schaltung zu erhalten.

Fig. 10 zeigt eine hierfür geeignete Analogsignalverarbeitungsschaltung 60 mit zwei Eingängen 61 und 62, denen die Ausgangssignale  $S_1(t)$  bzw.  $S_2(t)$  eines der zuvor beschriebenen Wandlersysteme zugeführt werden. Das dem Eingang 61 zugeführte Analogsignal  $S_1(t)$  wird in einer Differenzierschaltung 63 nach der Zeit differenziert. Der Ausgang der Differenzierschaltung 63 ist mit dem einen Eingang einer Multiplizierschaltung 64 verbunden, die am anderen Eingang das Signal  $S_2(t)$  empfängt. Das Ausgangssignal der Multiplizierschaltung 64 wird über einen Tiefpaß 65 einem Anzeigegerät 69 zugeführt.

Die Multiplikation der Signale in der Multiplizierschaltung 64 entspricht der Bildung der Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit  $\tau=0$ , wobei das Ergebnis infolge der vorhergehenden Differentiation des Signals  $S_1(t)$  unmittelbar der Steigung der Kreuzkorrelationsfunktion entspricht. Das Ausgangssignal des integrierenden Tiefpasses 65 stellt somit die Steigung der Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit  $\tau=0$  dar und kann in dem Anzeigegerät 69 unmittelbar zur Anzeige des zu messenden Volumenstroms bzw. Massenstroms dienen, wenn das Anzeigegerät 69 unter Berücksichtigung des entsprechenden Kalibrationsfaktors  $K$  geeicht ist.

Der Steigung der normierten Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit  $\tau=0$  ist das erste Moment des Kreuzleistungsdichtespektrums der Signale  $S_1(t)$  und  $S_2(t)$  mathematisch äquivalent. Es ist daher auch möglich, den Mikrocomputer so zu programmieren bzw. die an seiner Stelle verwendete Hardware-Schaltung so auszubilden, daß ein Ergebnis erhalten wird, das dem ersten Moment des Kreuzleistungsdichtespektrums entspricht. Aus diesem Wert kann dann der Meßwert des Volumenstroms und/oder des Massenstroms in gleicher Weise abgeleitet werden wie aus der Steigung der Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit  $\tau=0$ .

#### Patentansprüche

1. Anordnung zur berührungslosen Messung des Volumenstroms eines bewegten Mediums mit zwei Wändlern ( $W_1, W_2$ ), deren Geometrie und gegenseitige Anordnung aufgrund der räumlichen Kreuzkorrelationsfunktion  $\Phi_{12}(u)$  der räumlichen Gewichtsfunktionen  $((g_1(z), g_2(z))$  ihrer Erfassungsbereiche so bestimmt ist, daß der Gradient dieser räumlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der räumlichen Verschiebung Null vom Nullvektor verschieden ist, und die elektrische Signale  $(S_1(t), S_2(t))$  liefern, die durch Inhomogenitäten des bewegten Mediums abhängig von ihrer räumlichen Position nach den räumlichen Gewichtungsfunktionen der Erfassungsbereiche der beiden Wandler hervorgerufen werden, dadurch gekennzeichnet, daß der Wert für den Volumenstrom des bewegten Mediums aus der Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion  $(R_{12}(\tau))$  der beiden Signale  $(S_1(t), S_2(t))$  bei der zeitlichen Verschiebung Null oder aus dem ersten Moment des Kreuzleistungsdichtespektrums der beiden Signale  $(S_1(t), S_2(t))$  abgeleitet wird.
2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Wert für den Massenstrom des bewegten Mediums aus dem Wert für den Volumenstrom und aus der Dichte des Mediums abgeleitet wird.
3. Anordnung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Wandler (11, 12; 13, 14) mit sich kreuzenden Achsen ausgebildet und mit gegenseitiger Überlappung in der Bewegungsrichtung gegenüber einander versetzt angeordnet sind.
4. Anordnung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß jeder Wandler ( $W_1, W_2$ ) aus mehreren entlang der Bewegungsrichtung angeordneten Wandterelementen (21 bis 25; 31 bis 35) besteht, und daß zur Schaffung sich überlappender Erfassungsbereiche Wandterelemente (24, 25; 31, 32) der beiden Wandler miteinander verschachtelt sind.
5. Anordnung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die sich überlappenden Erfassungsbereiche der beiden Wandler ( $W_1, W_2$ ) durch unterschiedliche Zusammenfassung der Ausgangssignale mehrerer entlang der Bewegungsrichtung angeordneter Wandterelemente (41 bis 48) realisiert sind.

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

FIG. 3

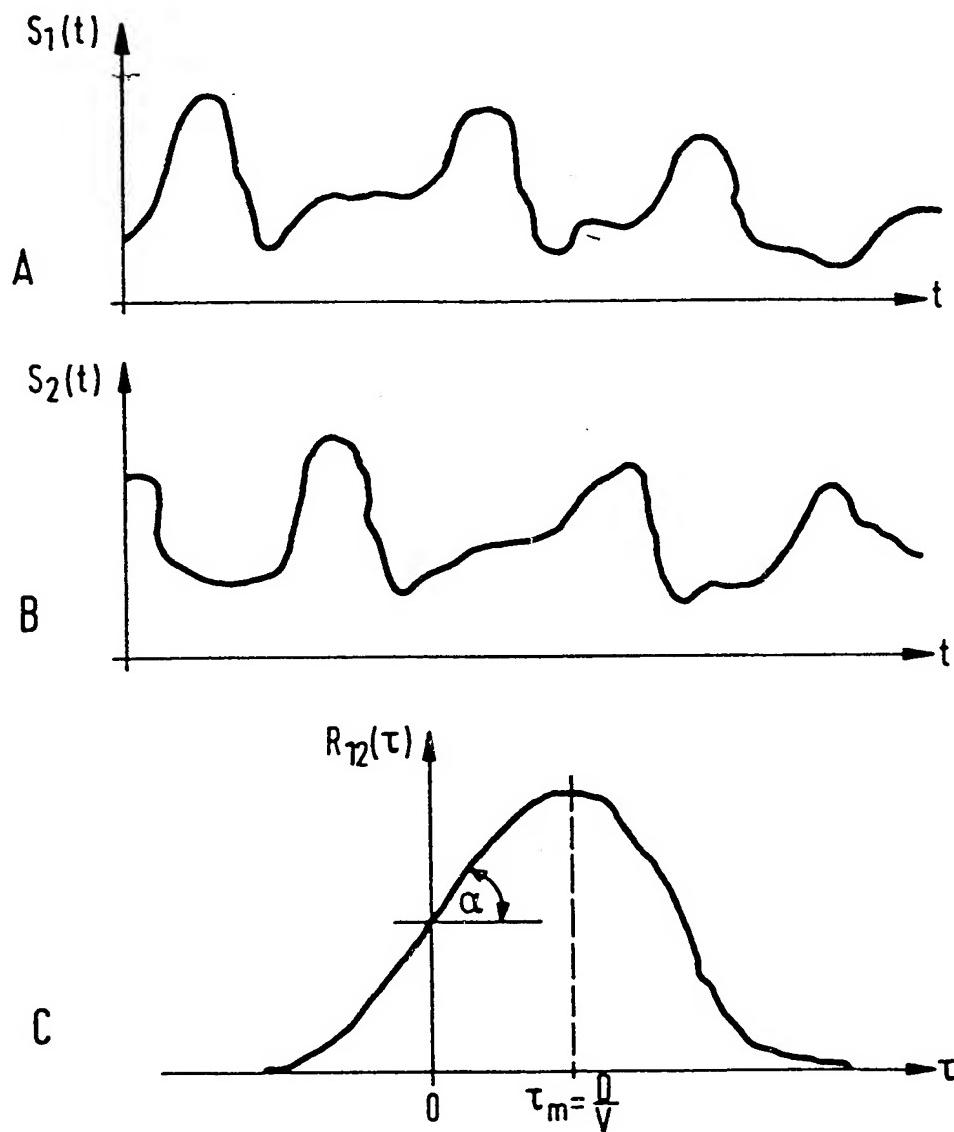


FIG. 4

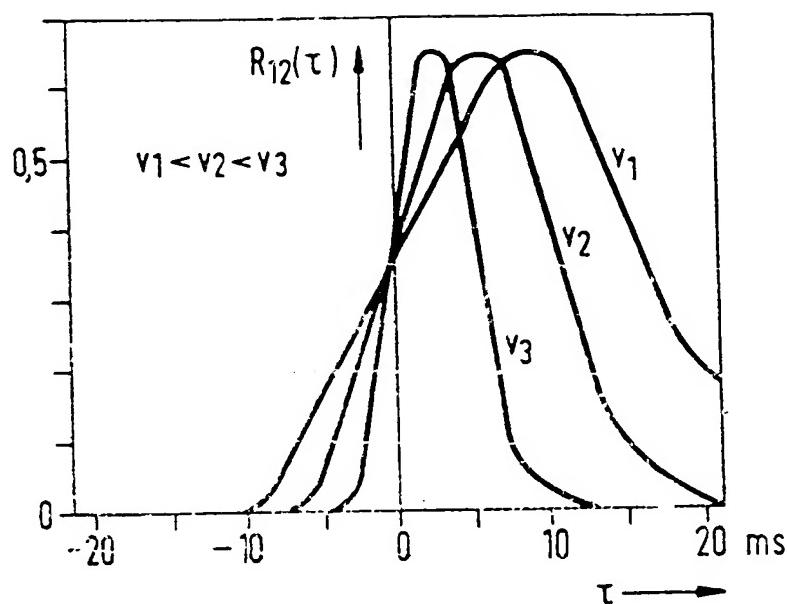
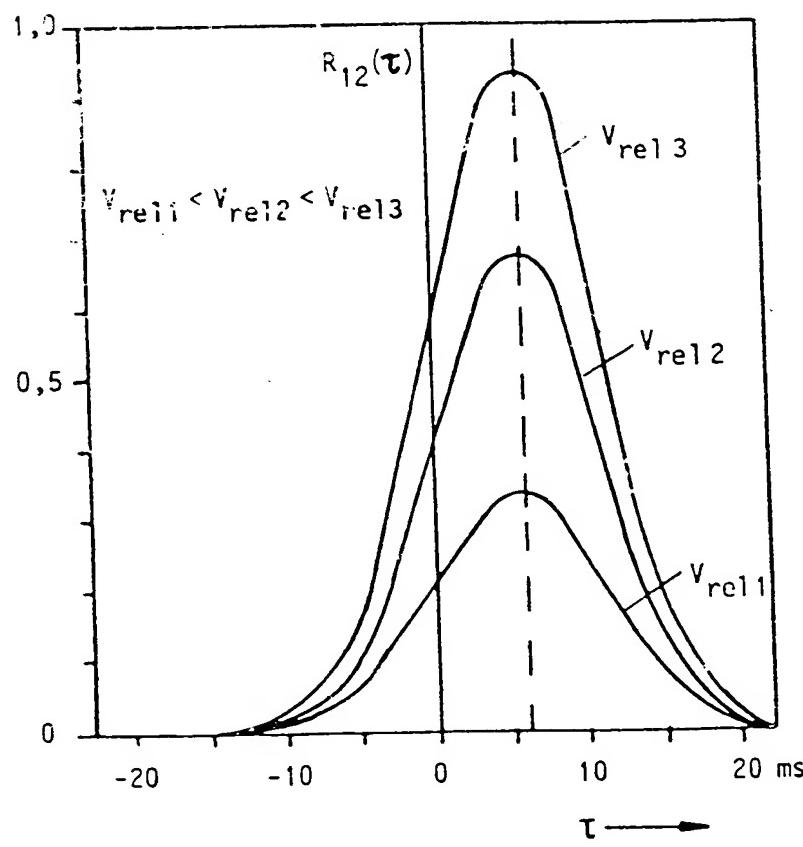


FIG. 5



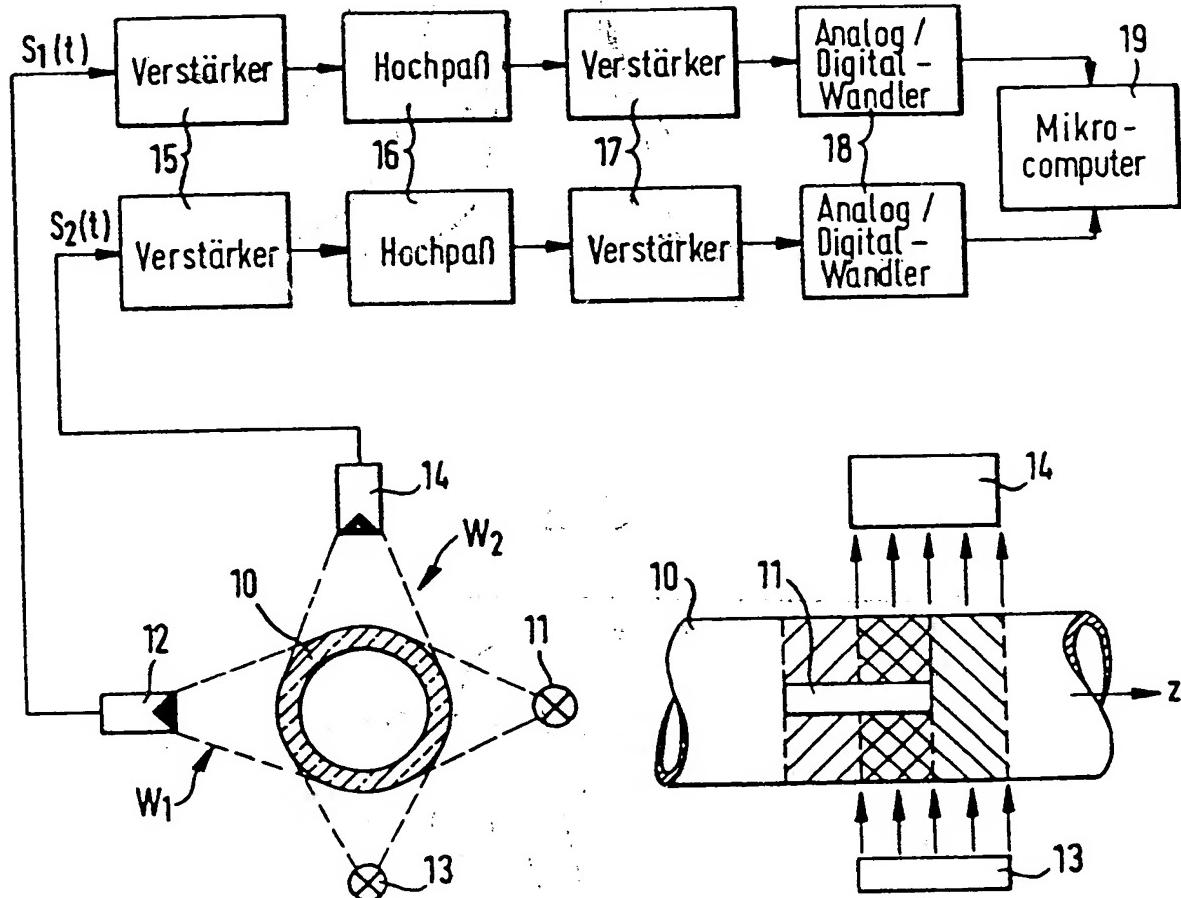


FIG. 6

FIG. 7

FIG.8

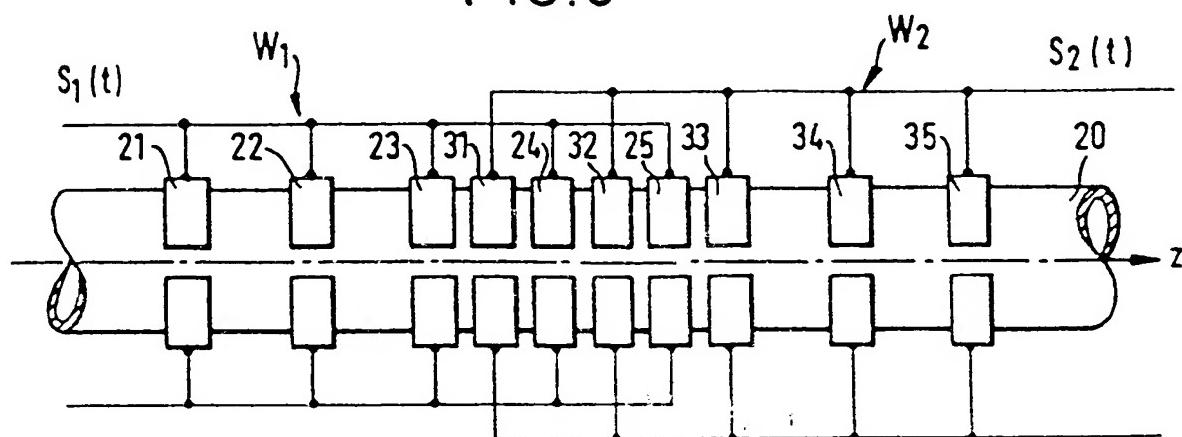


FIG.9

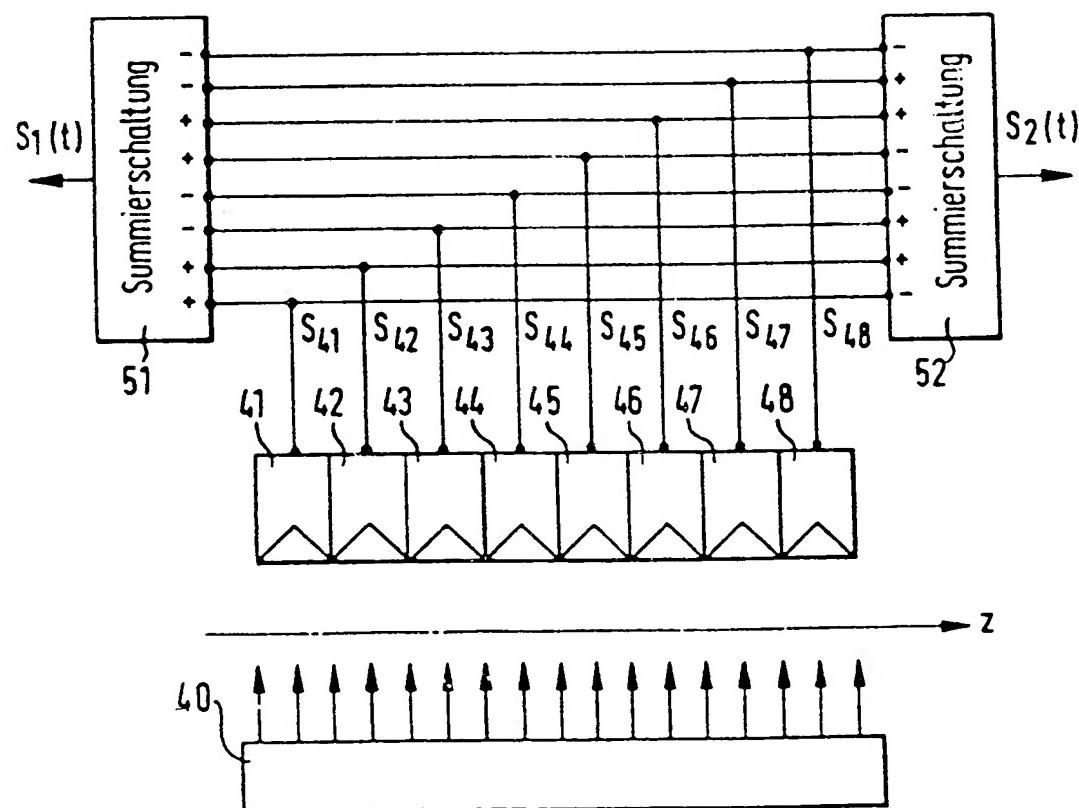


FIG.10

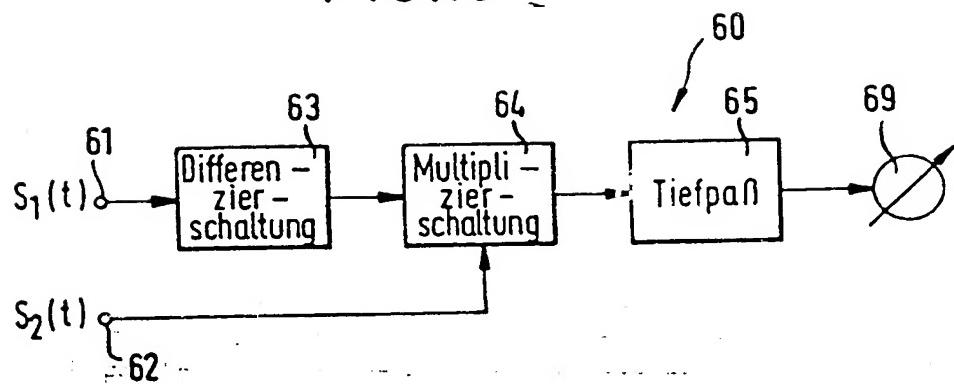


FIG.1

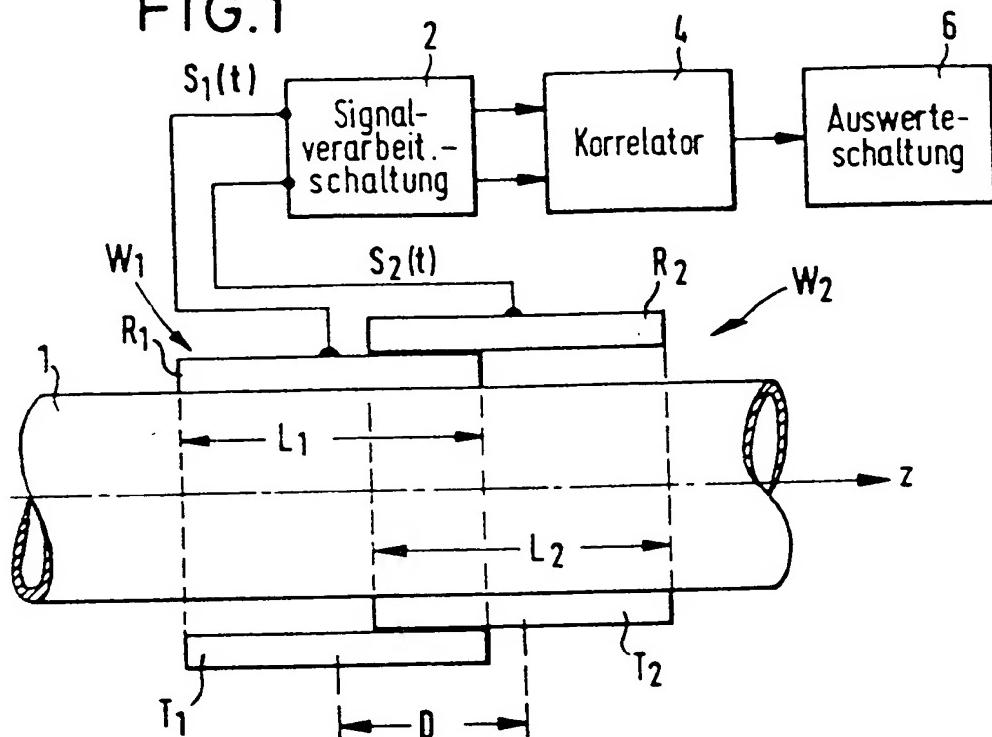


FIG.2

